

## 진공 예압형 공기베어링의 특성 해석

김경호\*(KAIST 기계공학과 대학원), 박천홍, 이후상(KIMM 지능형정밀기계연구부),  
김승우(KAIST 기계공학과)

### Analysis on characteristics of vacuum preloaded air bearing

K. H. Kim(Mech. Eng. Dept. KAIST), C. H. Park, Husang Lee(Int. & Pre. Mach. Dept. KIMM),  
S. W. Kim(Mech. Eng. Dept. KAIST)

#### ABSTRACT

This paper presents characteristics of vacuum preloaded porous air bearing. Pressure distribution of a porous pad and vacuum pocket are calculated. And load capacity and stiffness of the bearing are analyzed with various vacuum parameters, that is, clearance height, tube diameter, tube length, pumping speed of vacuum pump, vacuum pocket to porous pad area ratio.

From the simulation results, optimum clearance for best performance can be selected adjusting these parameters, especially tube diameter which is the most dominant source.

**Key Words** : Air bearing (공기 베어링), Vacuum preload (진공예압), Load capacity (부하용량), Stiffness (강성)

#### 1. 서론

최근 초정밀 스테이지용 베어링으로는 공기베어링이 널리 사용되고 있다. 공기베어링은 그 특성상 마찰이 거의 없고 평균화 효과로 인해 고정도를 달성할 수 있기 때문이다. 하지만, 강성이 상대적으로 낮아 이 문제점을 해결하기 위하여 예압을 가하기 위한 여러 방법들이 사용되고 있다. 예압을 가하기 위한 방법으로는 진공 예압, 자중 예압, 마그네틱 예압, 양면패드 예압 등이 널리 사용되고 있으며, 본 연구에서는 진공예압을 적용한 다공질 공기 베어링에 대해 다루고자 한다.

진공 예압형 다공질 공기 베어링의 특성을 알아보기 위해서는 다공질 공기 패드와 더불어 진공 패드를 함께 고려해야만 한다. 다공질 공기 패드에 대한 것은 이미 수많은 연구들이 진행되어 왔으므로 여기서는 진공 패드 부분에서의 압력 분포를 계산하고, 이를 다공질 공기 패드와 종합하여 전체적으로 진공 예압형 공기 베어링의 특성에 대해 살펴보고자 한다.

진공패드 해석 시 고려해야 할 주요 변수로는 진공패드와 레일 표면 사이의 간극을 통해 발생하는 컨덕턴스(conductance), 진공패드와 진공펌프를 연결하는 튜브를 통해 발생하는 튜브의 컨덕턴스, 그리고 진공펌프의 배기속도이다. 즉, 진공패드의 간극, 튜브의 직경 및 길이, 진공펌프의 배기속도 등의 변수들이 진공패드의 압력분포에 미치는 영향을 계산하여, 최종적으로 다공질 공기 패드와

결합된 진공예압형 공기 베어링의 특성(부하용량, 강성)에 대해 살펴보았다.

#### 2. 진공예압형 공기베어링 해석

진공예압형 공기 베어링 스테이지의 구조는 그림 1 과 같다. 다공질 재료와 레일면 사이의 간극을 통해 발생된 압력에 의해 테이블이 부상하게 되고, 이들 사이에 진공 포켓을 두어 진공펌프를 통해 진공압을 발생시켜 예압을 가하게 된다.

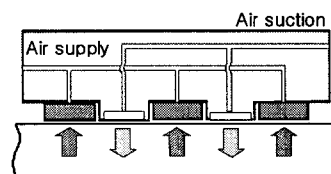


Fig. 1 Vacuum preloaded air bearing stage

##### 2.1 다공질 패드에 대한 압력분포 계산

다공질 공기 베어링에 대한 압력분포는 다공질 재료 내부, 다공질 재료와 간극 사이, 그리고 간극에 사이에 대한 지배 방정식으로부터 풀다.[1], [2]

우선 다공질 재료 내부의 기체의 흐름에 대한 지배 방정식은 Darcy 의 방정식으로부터 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_x \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

다공질 재료와 간극의 경계에 대한 방정식은 눈막힘 계수  $Ez$  를 고려하고, 유량의 평형방정식으로부터 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} k_x \frac{\partial p^2}{\partial x} \Big|_{x^-} dydz + k_y \frac{\partial p^2}{\partial y} \Big|_{y^-} dx dz + 2k_z \frac{\partial p^2}{\partial z} \Big|_{z^-} dx dy \\ = k_x \frac{\partial p^2}{\partial x} \Big|_{x^+} dydz + k_y \frac{\partial p^2}{\partial y} \Big|_{y^+} dx dz + 2E_z k_z \frac{\partial p^2}{\partial z} \Big|_{z^+} dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

간극 사이에 대한 방정식은 레이놀즈 방정식으로부터 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + h^3 \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} - 12k_z E_z \frac{\partial p^2}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

식 (1)-(3)을 FDM(Finite Difference Method)과 SOR(Successive Over Relaxation) 수치해석법을 이용하여 다공질 재료와 간극 사이의 압력분포를 계산할 수 있다.

## 2.2 진공 포켓에 대한 압력분포 계산

진공압을 발생시키기 위해서는 진공펌프를 사용하게 되는데, 진공펌프의 주된 선택기준 중 하나는 단위시간당 배기시킬 수 있는 기체의 양[l/min]으로써 정의되는 배기 속도(pumping speed)이다.

진공에압을 위한 펌프로는 고진공이 필요없으므로 일반적으로 기계식의 로타리 펌프를 이용한다. 그림 2 에서 보는 바와 같이 로타리 펌프 사용시 주된 사용 영역인 1 Torr 이상에서는 배기속도가 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 압력분포 계산시 배기속도를 상수로써 가정하였다.

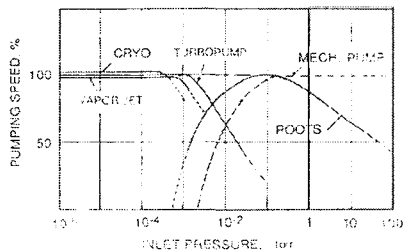


Fig. 2 Pumping speed of vacuum pump

그림 3 은 해석에 사용된 진공포켓과 다공질 패드를 나타낸 것으로, 진공포켓을 둘러싸고 있는 네면으로부터 기체가 포켓 안으로 들어가고 이를 진공펌프와 연결된 튜브를 통해 배기하고 있다. 이때 진공포켓의 외부 네 면에 대한 경계압력은 대기압으로 가정하였다.

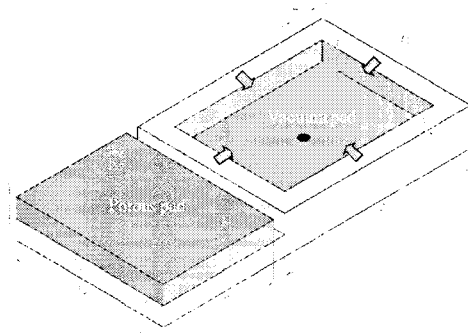


Fig. 3 Vacuum preloaded air bearing

그림 4 는 진공포켓에서의 압력을 계산하기 위한 모델을 보여주는 그림으로, 진공포켓을 작은 챔버로 간주하고 이 챔버 외벽에 간극이라는 리크(leak)가 존재하는 시스템으로 설정하였다.

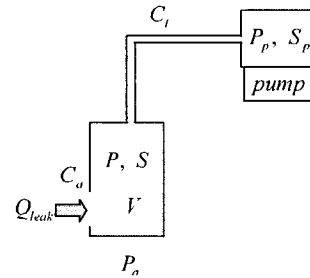


Fig.4 Modeling of vacuum pocket for calculation of pressure distribution

시스템의 컨덕턴스의 평형 방정식으로부터 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 S 는 진공포켓 내부의 배기 속도, P 는 압력, V 는 부피, S<sub>p</sub> 는 펌프의 배기 속도, P<sub>p</sub> 는 펌프입구부의 압력, P<sub>a</sub> 는 대기압, 그리고 C<sub>t</sub> 는 튜브의 컨덕턴스, C<sub>a</sub> 는 간극의 컨덕턴스를 의미한다. A 와 B 는 튜브나 간극의 형태에 따라 결정되는 상수값이다. [3], [4]

$$\begin{aligned} Q &= S \cdot P = -V \frac{dP}{dt} + Q_{leak} \\ &= S_p \cdot P_p = C_t (P - P_p) \\ \text{where, } Q_{leak} &= C_a (P_a - P) \\ \text{where, } C_t &= A \frac{P + P_p}{2}, C_a = B \frac{P_a + P}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 정리하여 시간에 따른 압력의 변화식으로 최종 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{S_p}{AV} (S_p - \sqrt{S_p^2 + A^2 P^2}) + \frac{B}{2V} (P_a^2 - P^2) \quad (5)$$

그림 5 는 수식 (5)에 의해 진공포켓 내의 압력을 시간에 대해 구해 본 것으로 0.4 초가 지나면 간극을 통해

안으로 들어오는 기체와 펌프를 통해 밖으로 배출되는 기체가 0.1 bar 정도의 압력에서 평형 상태를 이루고 있다.

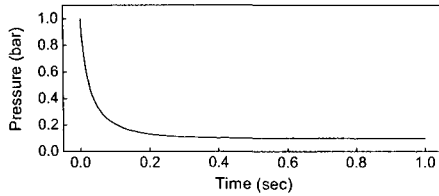


Fig.5 Pressure variation with time in vacuum pocket

한편, 진공포켓 내부의 최종압력을 구하기 위해서는 식(5)의 좌변의  $dP/dt$  항을 0 으로 놓고 계산하면 포켓에서의 최종압력을 구할 수 있다. 또한 진공포켓을 둘러싸고 있는 네 면의 간극에 대한 압력분포는 레이놀즈 방정식을 적용하여 구할 수 있다.

이상의 수식을 이용하여 그림 3의 해석모델을 이용하여 다공질 재료와 진공포켓에서의 압력분포를 계산하면 그림 6 과 같다. 여기서 공급압력은 5 bar, 진공펌프의 배기속도는 100 l/min 로 설정하였다.

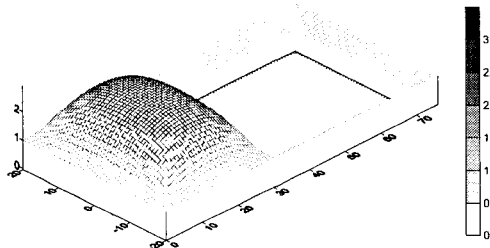


Fig.6 Pressure distribution in a porous pad and vacuum pocket

### 3. 여러 변수들의 영향 분석

진공에압된 공기 베어링의 부하중과 강성에 미치는 튜브 직경, 길이 및 펌프의 배기속도 등에 의한 영향을 살펴보았다. 단, 튜브의 컨덕턴스가 직경의 세제곱에 비례하므로 튜브의 직경이 거의 지배적으로 영향을 미치는 변수이다. 따라서 다음의 해석에서는 튜브 직경의 영향을 상대적으로 감소시키기 위해 튜브 직경을 작게 하여 해석을 수행하였다.

#### 3.1 부하용량과 강성 계산

진공에압된 공기베어링의 부하용량은 식 (6)과 같이 다공질 패드와 진공패드에서 지지할 수 있는 힘의 차로써 표현되며, 강성의 경우는 합으로써 표현된다.

$$W = W_2 - W_1 \quad (6)$$

$$S = -\frac{dW}{dh_2} = -\frac{dW_2}{dh_2} - \frac{dW_1}{dh_1} = S_2 + S_1$$

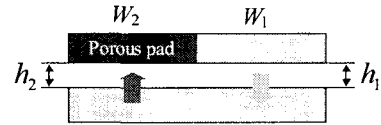


Fig.7 Load diagram of vacuum preloaded air bearing

#### 3.2 튜브 직경에 의한 영향

그림 8 은 튜브 직경에 의한 베어링의 특성을 살펴본 것이다. 직경이 크면 간극에 관계없이 포켓 내에 일정한 진공압이 형성되므로 부하중은 진공에압이 없을 때에 비해 이 진공압만큼 읍셋된 형태이며, 따라서 강성은 변화가 없다. 반면, 튜브 직경이 작아지면 간극에 의한 압력 변화가 발생하고, 이에 따른 추가 강성이 생성되어 강성이 증가하는 것을 알 수 있다.

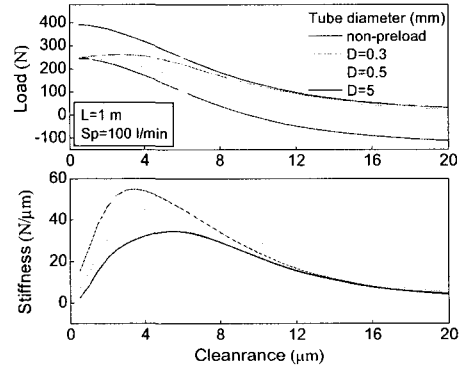


Fig. 8 Effect of tube diameter

#### 3.3 튜브 길이에 의한 영향

그림 9 는 튜브 길이의 영향을 살펴본 것으로 길이가 길수록 컨덕턴스가 작아져 부하용량은 미소하나마 약간 커지고, 간극에 의한 압력변화가 상대적으로 커져서 강성도 증가하는 것으로 나타났다.

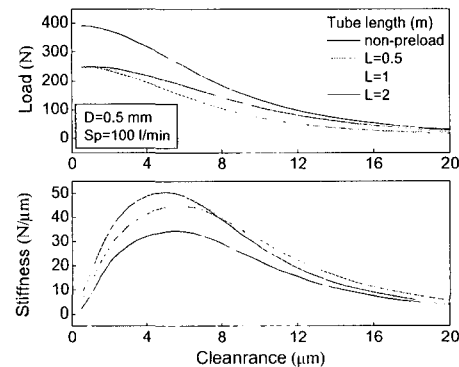


Fig. 9 Effect of tube length

#### 3.4 배기 속도의 영향

그림 10 으로부터 진공펌프의 배기속도는 부하용량과 강성에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 즉, 펌프의 배

기속도는 진공압에 도달하는 시간에만 관계됨을 확인할 수 있다.

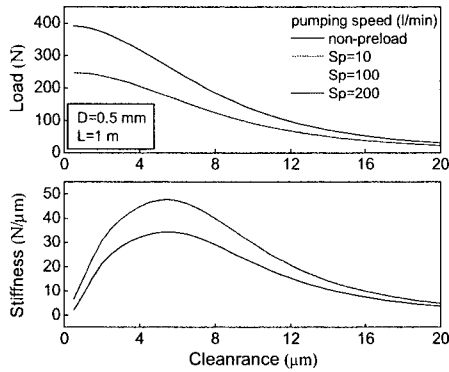


Fig. 10 Effect of pumping speed

### 3.5 다공질 패드와 진공 패드 면적비의 영향

그림 11은 다공질 패드와 진공 패드의 면적비에 따른 특성을 살펴보았다. 다른 조건은 모두 일치하므로, 다공질 패드에 대한 면적비가 증가할수록 면적비만큼 발생된 진공압에 의한 힘이 증가하고, 이에 따라 부하용량은 감소한다. 강성은 간극에 의한 영향이 이 면적비만큼 증폭되기 때문에 증가하는 경향을 보이고 있다.

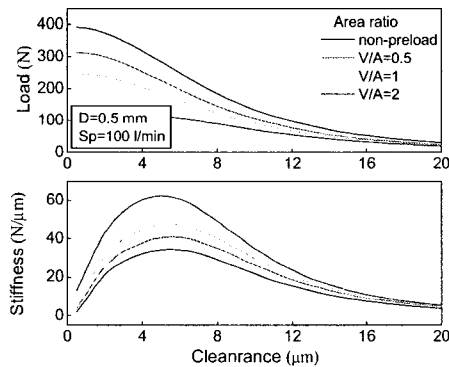


Fig. 11 Effect of porous pad to vacuum pocket area ratio

### 3.6 고찰

진공 예압형 공기 베어링의 부하용량과 강성은 펌프의 배기속도보다는 패드의 간극이나 튜브의 직경에 의해 지배적으로 영향을 받으며, 패드의 간극은 다공질 패드, 진공 패드에서 발생하는 힘, 베어링의 무게에 의해 결정되는 중속적인 값이므로 튜브의 직경을 조절함으로써 최적의 성능을 낼 수 있는 베어링의 간극을 설계할 수 있다.

결국, 진공 예압을 가하여 최대의 강성을 얻기 위해서는 그림 12와 같이 튜브의 직경을 줄여 진공패드 간극에 대해 발생하는 압력 변화를 크게 하여 진공패드의 강성을 늘리는 방법이 가장 좋은 방법이다. 그러나 이것은 아랫방향 하중만 고려한 것으로 윗방향 하중까지 고려한다면, 그림 13과 같이 부하하중은 좀 더 감소하지만, 튜브의 직경을 크게 하여 간극에 관계없이 일정한 진공압이 발생하

도록 설정하고, 이 진공압에 의해 평형 간극이 좁아져 강성이 증가하도록 하는 방법을 생각해 볼 수 있다.

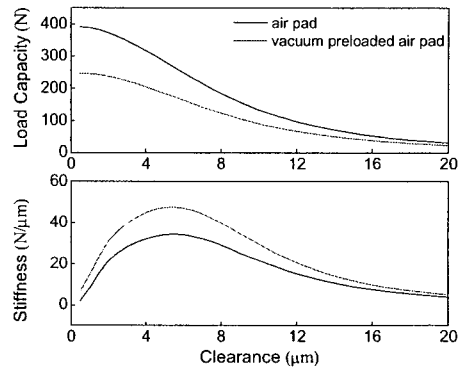


Fig. 12 Design direction 1

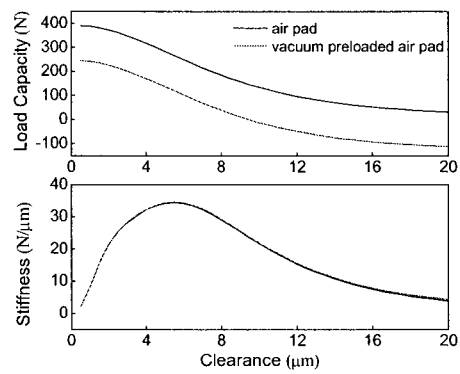


Fig. 13 Design direction 2

## 4. 결론

본 연구에서는 진공 예압된 다공질 공기 베어링의 압력분포 해석을 통해 여러 변수들이 공기 베어링의 부하용량과 강성에 미치는 영향을 살펴보았다.

향후 연구 과제로는 실험을 통하여 위의 이론해석을 검증하는 것과, 진공예압된 공기베어링의 안정성을 포함한 동특성에 대한 연구를 계획중이다.

## 참고문헌

1. K. H. Wu, C. Cusano, "Analysis of externally pressurized, double-pad, gas porous thrust bearing," ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 105, p.113-119, 1983.
2. 이찬홍 외, "초정밀 위치결정시스템 기술개발-국가차 정연구실사업 1 단계 완료보고서", 2002.
3. A. Roth, "Vacuum Technology", North-Holland Pub. Co., 1982.
4. Hablanian, M. H., "High-Vacuum Technology", Marcel Dekker Inc., 1997.